

ESTUDO DAS POSSÍVEIS CAUSAS DO DESLOCAMENTO LONGITUDINAL DE VIGAS SOBRE APARELHOS DE APOIO EM VIADUTO DA RODOVIA BR-101/SC

Rafael Nuernberg (1); Bruno do Vale Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) rafaeln@contato.net (2) dovalesilva@unesc.net

RESUMO

Em uma das obras de ampliação e adequação da BR-101/SC, mais precisamente no km 409, esta sendo executada uma cadeia de viadutos, subdividida em quatro trechos. Próximo a conclusão da obra, foi observado que as vigas principais do primeiro trecho estavam apresentando deslocamentos longitudinais excessivos sobre os aparelhos de apoio tipo neoprene fretado. Os aparelhos de apoio de neoprene são constituídos por elastômeros vulcanizados, podendo ser simples ou fretados. Possuem grande utilização na execução de pontes, viadutos e passarelas atuando como ligação flexível entre as peças de concreto pré-moldado. Este uso expressivo deve-se à sua fácil aplicação e baixo custo que exige pouca manutenção. Após análise, foi constatado que o principal fator responsável pelo deslocamento era a variação de temperatura, que apresentava valores superiores aos indicados pela NBR 6118:2007 item 11.4.2.1, resultando em um deslocamento longitudinal superior à capacidade de deformação do aparelho de apoio elastomérico. O objetivo principal deste trabalho é realizar pesquisas sobre possíveis fatores agravantes e uma verificação do dimensionamento do aparelho de apoio de neoprene fretado, a fim de garantir que a deformação máxima causada pela deformação térmica e demais reações possam ser absorvidas pelo aparelho elastomérico. O procedimento de dimensionamento foi realizado de acordo com as verificações recomendadas pela fornecedora do produto que utiliza como referência a norma europeia EN 1337-3:2005. Durante o processo de pesquisa, foi observado que não só a dilatação térmica, mas também fatores como a força gravitacional e erros de execução, agravaram a situação. Quanto ao dimensionamento, são apresentadas equações e planilhas com os resultados dos procedimentos, as condições de verificação e uma comparação com o aparelho utilizado inicialmente. Conclui-se o trabalho, realizando recomendações quanto à execução e sugestões para as dimensões do aparelho de apoio.

Palavras-Chave: Dimensionamento de aparelho de apoio. Neoprene fretado. Deslocamento de vigas.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os meios de transporte mais utilizados atualmente no Brasil, o transporte rodoviário corresponde a 60% do fluxo de cargas e 90% do transporte de passageiros (CNT, 2010). Desta forma, a necessidade de rodovias com maior capacidade tem se tornado indispensável para suprir à frota de veículos terrestres.

As obras de ampliação e adequação da BR-101 no estado de Santa Catarina, assim como em toda obra de grande porte, vem enfrentando alguns obstáculos. Como exemplo o morro dos Cavalos em Palhoça, a lagoa do Imaruí em Laguna e regiões com solos moles inadequados para pavimentação como o trecho entre Maracajá e Araranguá, necessitam de Obras de Arte Especiais.

A obra de ampliação e adequação da BR-101 nos dois Estados, Santa Catarina e Rio Grande do Sul beneficiará uma população de cerca de 800 mil habitantes em 25 municípios, integrando um importante eixo rodoviário por onde circulam turistas e cargas, além de ser uma esperança para a redução de acidentes, já que a rodovia BR-101 apresenta um dos maiores índices de acidentes do país. Portanto as execuções para duplicação e adequação da rodovia são urgentes, pois apresentarão melhores condições de operacionalidade, trafegabilidade e segurança para o usuário.

Foi tomado conhecimento de que na Obra de Arte Especial do viaduto de Araranguá, vigas longitudinais da superestrutura que estão apresentando pequenos deslocamentos em relação aos aparelhos de apoio de neoprene fretado. O fato de a estrutura possuir apenas a carga referente ao seu peso próprio, sem o revestimento asfáltico, e já apresentar manifestações patológicas torna a situação particularmente preocupante.

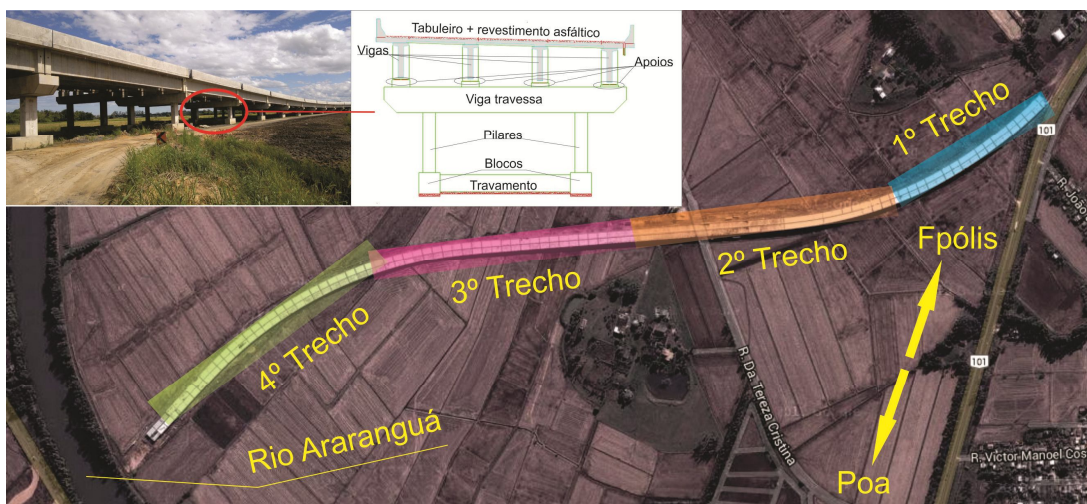
O presente trabalho pretende apresentar um levantamento dos possíveis motivos e prováveis soluções do problema para a manifestação patológica presentes no viaduto de Araranguá, que pertence às obras de ampliação e adequação da BR-101, lote 29, que estão sobre efeito de "rastejamento".

Ao longo do artigo será abordada a metodologia de execução da referida obra, o tipo de patologia associada, os fatores responsáveis pelo afloramento da manifestação patológica e um estudo das possíveis soluções.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente trabalho se propõe a estudar o dimensionamento para os aparelhos de apoio elastoméricos de um viaduto de concreto armado com 600 m de extensão projetado com duas pistas de largura igual a 13,2 metros cada, situado na rodovia BR-101 em Araranguá/SC (Figura 1).

Figura 1 – Foto do viaduto BR-101/SC, km 409.



Fonte: Google Earth (2011), Do autor (2013).

O viaduto apresentou deslocamentos longitudinais de até 11 cm quando o permitido era de 6 mm para as vigas principais, retirando as mesmas do seu devido eixo (Figura 2) e resultando em chance de colapso da estrutura. O principal objetivo novo dimensionamento é a garantia de funcionamento da estrutura sem riscos aos usuários.

Figura 2 – Foto do deslocamento da viga do viaduto BR-101/SC, km 409.



Fonte: Do autor (2013).

Para garantir os objetivos do presente trabalho, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- realizar pesquisas às bibliografias existentes, a procura de maiores conhecimentos em relação aos processos e métodos executivos para pontes e viadutos;
- consultar os profissionais diretamente envolvidos no projeto de recuperação do viaduto para tomar melhor esclarecimento dos detalhes técnicos;
- obter dados iniciais ao projeto dos apoios para as vigas pré-moldadas da Rodovia BR-101/SC;
- definir os trechos do viaduto a ser restaurado;
- analisar a patologia em questão, bem como o efeito resultante na estrutura;
- obter dados de adequação a serem implantados ao projeto dos apoios para as vigas pré-moldadas da Rodovia BR-101/SC;
- consultar as normas técnicas de referência a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para obter uma melhor orientação na área de processos executivos de estruturas de concreto.
- determinar do novo dimensionamento do aparelho de neoprene fretado para restauração do viaduto através de planilhas;
- comparar o dimensionamento dos apoios elastoméricos do viaduto na Rodovia BR-101/SC.

3. METODOLOGIA EXECUTIVA

A execução do viaduto em Araranguá utiliza o mais empregado e simples dos métodos construtivos, pontes em vigas do tipo “I” com elementos pré-moldados sobre dois apoios. O comprimento total do viaduto é de 600 m, sendo que a Tabela 1, apresenta as principais características geométricas da superestrutura.

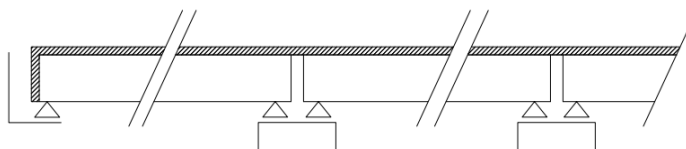
Tabela 1 - Dados gerais da estrutura

Fck	35			Mpa		
Classe de agressividade	II			-		
Comprimento do vão	19,70			m		
Classe da ponte	45			-		
Tabuleiro				uni.		
Largura	13,2			m		
Taxa de armadura	1,20			%		
Espessura	0,25			m		
Volume de concreto	65,01			m ³		
Viga						
Volume de concreto	9,46			m ³		
Contra flecha	6,00			cm		
Nº de vigas por vão	8			uni.		
Taxa de armadura	2,99			%		
	H	hf	bw	bf	abas	-
Dimensão Transversal	160	10	26	76	25	cm

Fonte:DNIT (2012).

O método de vigas sobre dois apoios permitiu a utilização de um tabuleiro contínuo, reduzindo o número de juntas de dilatação para um em cada três ou quatro vãos (Figura 3).

Figura 3 - Representação de vigas sobre dois apoios em vários vãos.



Fonte: Leonhardt (1979).

Na execução com pré-moldados sobre vão inteiro existe uma subdivisão da largura da ponte em faixas longitudinais ou nas vigas principais longitudinais, a qual é unida por juntas concretadas “in situ”, transversalmente (LEONHARDT, 1979). (Figura 4)

Figura 4 - (a) Junta de dilatação e (b) junta concretada 'in situ' (Laje elástica).



Fonte: Do autor (2013).

Sendo que a função da junta de dilatação é permitir o deslocamento longitudinal do tabuleiro devido a forças horizontais como deformação térmica, enquanto a junta concretada "in situ", devido a sua menor espessura, permite deslocamentos verticais, causados pela elevação da estrutura no momento da troca ou manutenção dos apoios de neoprene fretado.

Quanto às vigas, além de apresentarem fácil produção "in loco", o fato de ser um elemento pré-moldado o torna um método muito econômico, já que apresenta uma estrutura repetitiva, extensa e possui a disposição maquinário para transporte e elevação das peças (LEONHARDT, 1979).

4. TIPOS DE APOIOS

De acordo com El Debs e Takeya (2009), na construção de pontes, a estrutura deve funcionar de acordo com as hipóteses determinadas nos cálculos, assim a utilização de apoios em locais estipulados pelo projetista terá como função admitir a possibilidade de deslocamento da estrutura.

Este deslocamento pode ser de rotação ou translação, com isso os apoios podem ser classificados em três tipos: articulações fixas, móveis e elásticas.

- Articulações fixas permitem o efeito de rotação, gerando forças no sentido vertical e horizontal do vínculo.

- Articulações móveis permitem efeito de rotação e translação, gerando apenas forças verticais ao vínculo. Devido ao atrito que não pode ser totalmente eliminado é gerada uma força horizontal, porém pode ser desprezado pelo baixo valor.
- Articulações elásticas atuam praticamente como articulações móveis, porém não podem ter sua força horizontal desprezada.

5. APOIOS DE ELASTÔMEROS (NEOPRENE FRETADO)

A nomenclatura “Neoprene” é a denominação comercial de um elastômero (borracha sintética) à base de policloropreno, que tem como características:

- Módulo de elasticidade transversal de valor muito baixo;
- Módulo de elasticidade longitudinal, também de valor muito baixo;
- Tensão normal de compressão de serviço com valor razoável, da ordem de grandeza dos concretos usuais;
- Grande resistência às intempéries.

Quando uma placa de neoprene é posicionada entre a super e mesoestrutura, a placa funciona como uma articulação elástica, permitindo movimentos de translação e rotação, possibilitando grande deformabilidade transversal e longitudinal respectivamente, isto é decorrente das duas primeiras características do neoprene (El Debs e Takeya, 2009). (Figura 5)

Figura 5 – Apoio de viga bi apoiada.

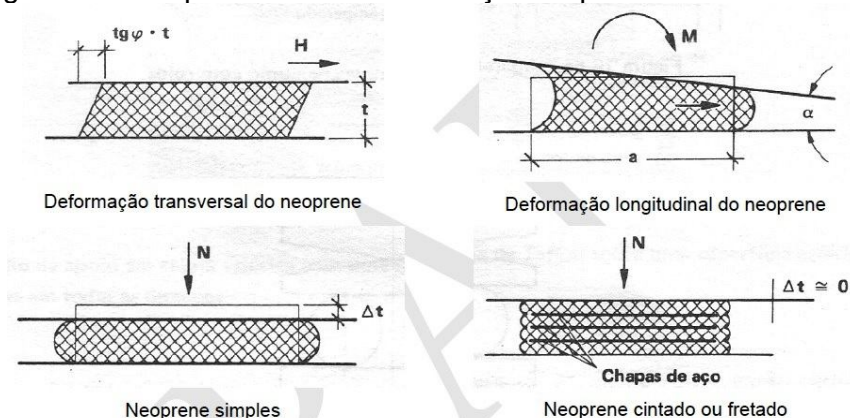


Fonte: Do autor (2013).

De acordo com Machetti (2007), o aparelho de apoio fretado é composto por camadas alternadas de elastômero e chapas de aço, que adquirem aderência durante o processo de vulcanização.

Segundo Leonhardt (1979, p.214), a chapa de aço é utilizada para enrijecer o aparelho de apoio na direção vertical (esforço normal de compressão), sem alterar a mobilidade horizontal e a capacidade de rotação, tornando-o quase incompressível, possibilitando desconsiderar deformações verticais oriundas de cargas verticais variáveis.

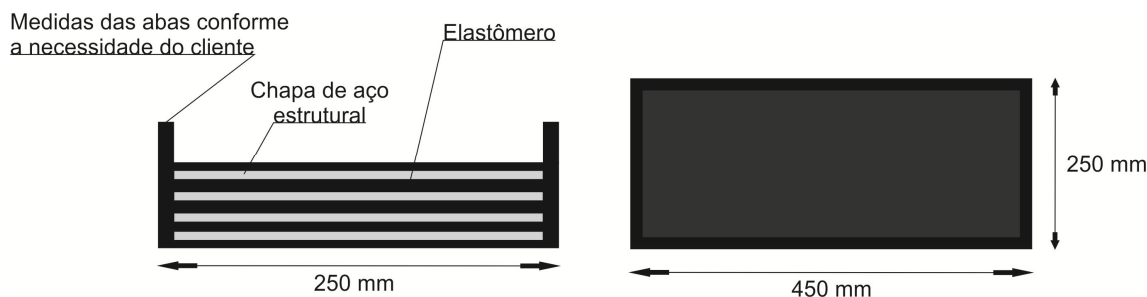
Figura 6 – Comportamento a deformação de placas de elastômeros.



Fonte: LEONHARDT (1979).

Na obra em estudo foi optada a utilização de neoprene fretado com abas, este tipo de neoprene fretado é utilizado em obras que possuam inclinações variáveis, superelevação e diferença de cotas entre apoios tanto de uma mesma linha de apoio quanto de linhas seqüentes. Em virtude da dificuldade, geralmente apresentada em garantir a paralelismo, horizontalidade e a planicidade entre o apoio e a estrutura, a função das abas é de atuar como “forma”, possuindo suas abas com inclinação conforme o projeto, sendo preenchida geralmente com graute ou resinas. Desta forma, a inclinação correta dos apoios garante a distribuição linear das cargas.

Figura 7 – Exemplo de neoprene fretado com abas.



Fonte: Elastim (2013).

Para Leonhardt (1979, p.77), os apoios das pontes devem cumprir as seguintes exigências funcionais:

1. Transmitir as cargas permanentes e acidentais da estrutura para as fundações.
2. Para estruturas hiperestáticas, transmitir às fundações as reações ocasionadas pelos esforços de coação, variação térmica e similar.
3. Transmitir os esforços horizontais das reações de apoio derivados de efeitos como ação do vento, atrito nos apoios, terremotos e etc.
4. Permitir deformações longitudinais da superestrutura e dos pilares, resultantes de variações de temperatura, protensão, retração, deformação lenta do concreto e etc., sem impedimentos ou através de esforços de coação calculáveis e que possam ser absorvidos.
5. Permitir deformações na super e infra-estrutura, como flechas das vigas principais e suas rotações de apoio e torção, recalque ou rotação das fundações, sem impedimentos ou através de esforços de coação calculáveis e que possam ser absorvidos.
6. Os apoios devem apresentar durabilidade e fácil execução com baixo custo.
7. Em muitos casos os apoios apresentam efeito estético nas pontes, por isso necessitam de formas e proporções harmoniosas.

6. FATORES AGRAVANTES

Durante análise do problema ocorrido foram determinados os fatores agravantes responsáveis pelo surgimento da manifestação patológica. Os mesmos serão descritos a seguir.

6.1 Deformação térmica

Em uma obra, qualquer fator que altere o volume das peças estruturais pode resultar em tensões. A NBR 7187:2003 determina que no caso de variação de temperatura para pontes, condicionadas a NBR 6118:2007, deverá ser admitida uma variação de temperatura de 15°C, para mais ou para menos, da temperatura média da região. Conforme a lei de Hooke, a dilatação do concreto pode ser definida pela Equação 1 (MARCHETTI, 2007):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \text{onde} \rightarrow \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = \Delta \ell / \ell \quad \text{Equação 1}$$

Igualando as equações da deformação específica (ε), é obtido a Equação 2:

$$\alpha \cdot \Delta T = \Delta \ell / \ell \rightarrow \underline{\Delta \ell = \ell \cdot \alpha \cdot \Delta T} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

σ = Tensão

ΔT = Variação de temperatura

E = Módulo de elasticidade

$\Delta \ell$ = Variação do comprimento

ε = Deformação específica

ℓ = Comprimento

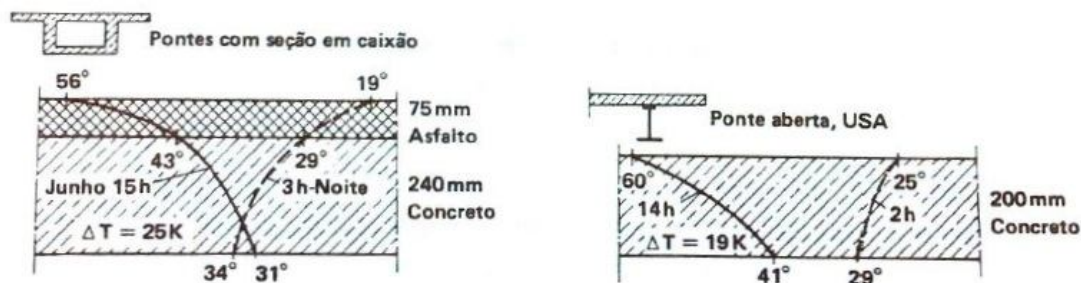
α = Coeficiente de dilatação térmica

Na obra em pauta, assim que verificado a manifestação patológica, uma das constatações realizadas, foi que no local de implantação da obra a temperatura ambiente apresenta grande variação durante o ano, alcançando picos de 40°C no verão e aproxima-se de 0°C no inverno (Epagri, 2009). Como a situação real apresenta um ΔT maior do que o recomendado em norma, este fator acaba possibilitando uma deformação maior do que a prevista em projeto.

Outro fator agravante é a ausência do revestimento asfáltico, de acordo com Leonhardt (1979, p.106), o efeito da variação de temperatura freqüentemente resulta no surgimento de fissuras, em diversas vezes quase levou ao colapso pontes de

concreto protendido. No caso de lajes de tabuleiro, podem surgir variações de temperatura $\Delta T = 25k$, quando existir revestimento asfáltico, e $\Delta T = 19k$ quando não existir revestimento asfáltico. Observando a figura 5 é possível verificar que com o revestimento asfáltico a variação de temperatura na superfície do tabuleiro, no mesmo dia, apresenta um $\Delta T=14^{\circ}C$ enquanto quando não há presença do revestimento a variação de temperatura pode apresentar um $\Delta T=35^{\circ}C$, superando o ΔT recomendado pela norma NBR6118:2007 item 11.4.2.1.

Figura 5 – Temperatura em lajes de tabuleiro, em $^{\circ}C$.

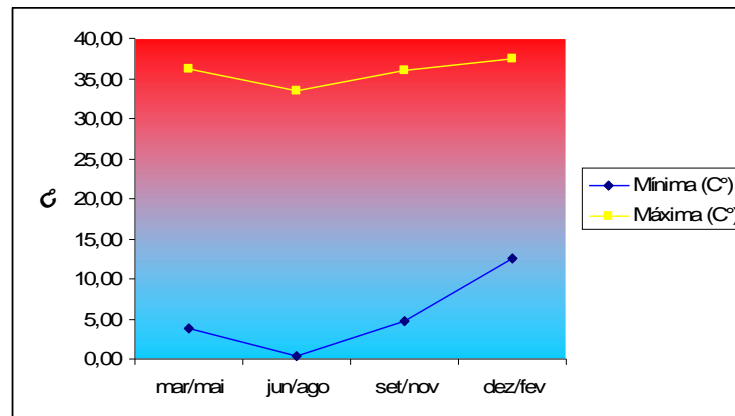


Fonte: LEONHARDT (1979)

Ainda segundo Leonhardt (1979, p.210), todos os movimentos possíveis devem ser levados em conta de maneira muito conservadora ainda mais quando se trata do ΔT , e ainda sugere que para locais onde a temperatura inicial seja $T = 10^{\circ}C$, utilizar $\Delta T = \pm 30^{\circ}C$ e que para os movimentos calculados, majorá-los com um coeficiente de segurança de $V_{\Delta T} = 1,3$.

Os dados a seguir são relacionados à temperatura média mínima e máxima trimestral da região 2b da Figura 7, e mostra claramente que a variação da temperatura na região onde é executada a obra, esta acima da recomendação citada na NBR 6118:2007.

Figura 6 – Limiares da temperatura mínima e máxima.



Fonte: Epagri (2009)

Figura 7 – Localização das estações e respectivas regiões climaticamente homogêneas.

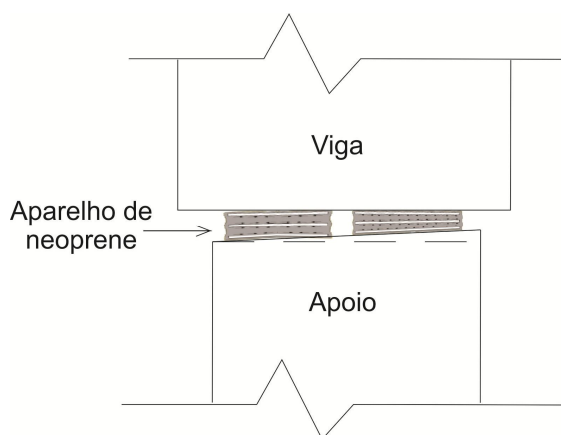


Fonte: Epagri (2009)

6.2 Nivelamento dos calços

Geralmente a tensão devido a rotação de um aparelho tem origem na rotação solicitada pelas cargas aplicadas na estrutura, porem quando durante a execução, o apoio não apresenta um perfeito nivelamento, este pode resultar um uma tensão de rotação adicional devido a não distribuição uniforme das cargas (Neoprex, 2012).

Figura 8 – Neoprene sobre efeito de rotação.



Fonte: Do autor (2013).

Durante a inspeção no viaduto em estudo, foi observado que alguns apoios não apresentavam um nivelamento ideal ou apresentavam resíduos de concreto entre a viga e o apoio, gerando uma reação extra em um lado da viga, como cada apoio comporta dois aparelhos de neoprene, resultava que um deles era sobrecarregado com uma maior solicitação de cargas atuantes, causando deslocamento e até mesmo o rompimento do aparelho.

Figura 9 – Neoprene deslocado devido ao mau nivelamento do apoio.



Fonte: DNIT (2012).

6.3 Geometria da estrutura

No caso dos viadutos do contorno de Araranguá existem cadeias em trechos de rampa longitudinal e cadeias em nível devido a rodovia que passa sob o viaduto. Nas cadeias com rampa longitudinal acentuada, quando a mesma aumenta de temperatura, os aparelhos de apoio começam a deformar-se até atingirem o limite, a partir daí a estrutura começa a deslizar sobre os mesmos e isso ocorre com mais intensidade no sentido descendente da rampa, sentido da gravidade, fazendo com que o deslizamento seja maior nos aparelhos de apoio mais baixos. Da mesma forma, quando a cadeia sofre uma redução de temperatura e contrai-se, o deslizamento ocorre com maior intensidade nos aparelhos de apoio mais altos da cadeia (DNIT, 2012).

Figura 10 – Deslocamento agravado pela força gravitacional.



Fonte: Do autor (2013).

Segundo o DNIT, no caso das cadeias com rampa longitudinal suave ou em nível, a gravidade não tem tanta influência e outros fatores influenciam na questão de sobre quais aparelhos de apoio a superestrutura irá deslizar mais, ou menos. Dentre esses fatores podemos citar a variabilidade do coeficiente de atrito do neoprene com o concreto, imperfeições construtivas, variabilidade da incidência solar em todo o comprimento da cadeia, etc. Esse é o efeito que chamamos de rastejamento, ou seja, é um processo gradativo que faz com que a superestrutura apresente um deslocamento relativo à meso e infra-estruturas, quando as deformações devido às

variações de temperatura são maiores do que as previstas e os aparelhos de apoio de neoprene não têm condição de absorver toda essa deformação.

7. DIMENSIONAMENTO DO APOIO DE NEOPRENE FRETADO

O dimensionamento de apoio de neoprene fretado pode ser realizado por métodos de vários autores como Pfeil (1988), Marchetti (2007), pela norma alemã, DIN 4141-14 (1985), por Basler e Witta (1967) e pelos próprios fabricantes, porém, em um estudo realizado por um acadêmico da Universidade Regional de Blumenau, que tinha como objetivo realizar uma comparação dos métodos chegou à seguinte conclusão:

“Desta forma ficou claro, devido a grande diferença no modelo de procedimento, que hoje a parte mais envolvida com os métodos de dimensionamento é o próprio fabricante. Pois no procedimento estudado, observa-se que já existem alguns itens que são levados em conta como possíveis erros de fabricação, falhas na aplicação e também apresenta uma solução diferente de todos os outros autores para cálculo da flambagem, sendo assim o único que atende o exemplo utilizado neste trabalho.” (Stein, 2012, p.66)

Portanto o dimensionamento a seguir será realizado com base nas verificações recomendadas pela empresa que forneceu os aparelhos de apoio para a obra em estudo, que embasa seu dimensionamento de acordo com a norma européia EN1337-3:2005.

7.1 Cálculo da deformação do neoprene

Considerando que a deformação do concreto se dá para os dois lados, é possível afirmar que a deformação do neoprene (U_g) é a metade do valor da deformação térmica (Δl) do concreto. Sendo assim, igualando as Equações 3 e 4, é possível determinar a força horizontal accidental (H_g) gerada pela nova variação da temperatura.

$$U_g = \frac{H_g \cdot T}{G \cdot a \cdot b} \quad \text{Equação 3} \qquad \frac{U_g}{2} = l \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

U_g – Deformação do neoprene (cm);

- H_g – Força horizontal acidental (kN);
 T – Espessura total de neoprene (cm);
 G – Módulo transversal do neoprene (kN/cm²);
 A – Dimensão longitudinal do neoprene (cm);
 B – Dimensão transversal do neoprene (cm).

7.2 Cálculo do deslocamento acidental

A fim de prever eventuais erros de fabricação do aparelho de apoio, a fornecedora apresenta em seu procedimento de dimensionamento o cálculo do deslocamento acidental, Equação 5.

$$u_q = \frac{H_q \cdot t}{2 \cdot G_n \cdot a \cdot b} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

- u_q – Deslocamento acidental ou deformação do neoprene (cm);
 H_q – Força do deslocamento horizontal acidental (KN);
 a – Dimensão paralela ao eixo longitudinal da ponte (cm);
 b – Dimensão transversal ao eixo da ponte (cm);
 t – Espessura de cada lamina do elastômero (cm);
 G_n – Módulo transversal do neoprene (KN/cm²).

7.3 Limite de compressão sob carga acidental

Esta equação leva em conta o deslocamento acidental horizontal e as dimensões das placas de aço.

$$\sigma = \frac{F_g + F_q}{(a' - u_g - u_q) \cdot b'} < \sigma_{adm} \quad \text{Equação 6}$$

$\sigma_{adm} =$	80 kgf/cm ²	para $a < 15$ cm
$\sigma_{adm} =$	100 kgf/cm ²	para $15 \leq a < 20$ cm
$\sigma_{adm} =$	125 kgf/cm ²	para $20 \leq a < 30$ cm
$\sigma_{adm} =$	150 kgf/cm ²	para $30 \leq a$

Onde:

F_g – Força horizontal de longa duração (kN);

F_q – Força horizontal de curta duração (kN);

a' – Largura útil ($a - 2.c$) do aparelho de apoio (cm);

b' – Comprimento útil ($b - 2.c$) do aparelho de apoio (cm).

7.4 Limitação da deformação por cisalhamento no elastômero, fator de forma

Para Pfeil (1988), fator de forma é a relação entre a área comprimida e a área lateral do aparelho de apoio. Este cálculo é necessário devido o módulo de elasticidade varia de acordo com a forma do aparelho. A figura a seguir ilustra o fator de forma, que é calculado pela Equação 7.

Fonte: Guerreiro (2003).

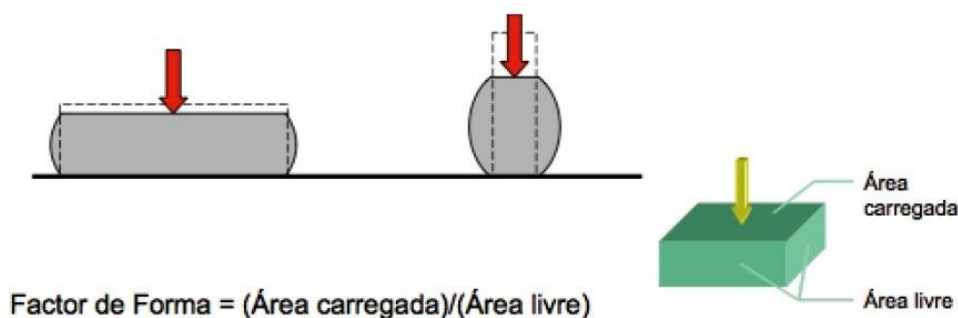


Figura 11 – Representação do fator de forma.

$$F_f = \frac{a*b}{2*(a+b)*h_n}$$

Equação 7

Onde:

F_f – Fator de forma;

a – Largura do aparelho de apoio (cm);

b – Comprimento do aparelho de apoio (cm);

h_n – Altura da camada de elastômero (cm).

7.5 Tensão de cisalhamento devido a rotação

Esta verificação é dada através do somatório da rotação oriunda do peso próprio da estrutura e rotações ocasionadas por cargas acidentais, Equação 8.

$$E_{\alpha} = \frac{a'^2 * (\alpha_g + \alpha_q)}{2 * h_n^2 * n}$$

Equação 8

Onde:

a' – Largura útil ($a - 2.c$) do aparelho de apoio (cm);

α_g – Ângulo de rotação inicial do aparelho de apoio (rad);

α_q – Ângulo de rotação final do aparelho de apoio (rad);

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

n – Número de camadas de elastômero (und).

7.6 Tensão de cisalhamento devido a compressão

No calculo de cisalhamento a compressão, é adicionado um coeficiente de segurança “k”, que pode ser de 1,5 para cargas vivas ou 1,0 para cargas acidentais, Equação 9.

$$E_C = \frac{1,5.(F_g.K + F_q)}{G_n.F_f.A_r}$$

Equação 9

Onde:

F_g – Força horizontal de longa duração (kN);

F_q – Força horizontal de curta duração (kN);

K – Coeficiente de majoração das cargas acidentais ou vivas;

F_f – Fator de forma;

G – Módulo transversal do neoprene (kN /cm²);

A_r – Área útil do aparelho de apoio (cm²).

7.7 Tensão de cisalhamento devido a deslocamentos

Este cálculo leva em conta deslocamento derivado de defeitos construtivos e deslocamentos provocados pela má instalação do aparelho de apoio, Equação 10.

$$E_h = \frac{(u_g + u_q)}{n \cdot h_n} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

u_q – Deslocamento acidental ou deformação do neoprene(cm);

u_g – Deformação do neoprene (cm);

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

n – Número de camadas de elastômero (und).

7.8 Somatório das tensões de cisalhamento

Para Equação 11, seu somatório deve apresentar valor inferior ao valor limite estipulado pela fornecedora do produto.

$$\Sigma E = E_\alpha + E_c + E_h < 5 \quad \text{Equação 11}$$

7.9 Limitação de deslocamento horizontal

Para este cálculo será utilizado duas equações, 12 e 13, para verificação.

$$tgy_g = \frac{u_g}{n \cdot h_n} \leq 0,5 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

u_g – Deformação do neoprene (cm);

n – Número de camadas de elastômero (und).

$$tgy_{g+q} = \frac{u_g + u_q}{n \cdot h_n} \leq 0,7$$

Equação 13

Onde:

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

u_g – Deformação do neoprene (cm);

u_q – Deslocamento accidental ou deformação do neoprene (cm);

n – Número de camadas de elastômero (und).

7.10 Verificação da estabilidade de rotação

Para esta verificação a empresa que fornece o aparelho faz uma consideração sob cargas totais, utilizando escorva de 0,2cm para $F=0,3 \cdot 150 \cdot 19,2 \cdot 39,2= 33869\text{kgf}$
 $=338,69 \text{ kN}$, Equação 14.

$$\sum V = \frac{(F_q + F_g - F) \cdot n \cdot h_n}{A_r} * \left(\frac{1}{5 \cdot G_n \cdot F_f} * \frac{1}{2000} \right) + es \geq \frac{a' \cdot (\alpha_g + \alpha_q)}{n}$$

Equação 14

Onde:

F_g – Força horizontal de longa duração (kN);

F_q – Força horizontal de curta duração (kN);

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

n – Número de camadas de elastômero (und);

F_f – Fator de forma;

α_g – Ângulo de rotação inicial do aparelho de apoio (rad);

α_q – Ângulo de rotação final do aparelho de apoio (rad).

Sob cargas permanentes, Equação 15:

$$\sum v = \sum v(\text{cargas totais}) * \frac{F_g}{F_g + F_q} > \frac{a' \cdot \alpha_g}{n}$$

Equação 15

Onde:

F_g – Força horizontal de longa duração (kN);

F_q – Força horizontal de curta duração (kN);

α_g – Ângulo de rotação inicial do aparelho de apoio (rad);

n – Número de camadas de elastômero (und).

7.11 Verificação a flambagem

Para esta verificação, outros autores utilizam como limite da altura do aparelho a menor dimensão em planta, porém as empresas que fabricam este material utilizam uma equação mais detalhada, Equação 16, determinando um resultado com maior precisão.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{2.a'.G_n.F_f}{n.(n.h_n+2,8.0,25)} \geq \frac{F_g+F_q}{A_r} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

G – Módulo de cisalhamento do elastômero (kN /cm²);

a' – Largura útil ($a - 2.c$) do aparelho de apoio (cm);

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

F_f – Fator de forma;

n – Número de camadas de elastômero (und);

F_g – Força horizontal de longa duração (kN);

F_q – Força horizontal de curta duração (kN);

A_r – Área útil do aparelho de apoio (cm²).

7.12 Dimensionamento das chapas

O dimensionamento das chapas ocorre de acordo com a Equação 17.

$$t_s = 1,3 * \left(\frac{h_n^2}{f_{yk}} \right)$$

Equação 17

Logo: $t_s \geq t_{s,min}$

Onde:

h_n – Altura da camada de elastômero (cm);

F_{yk} – Módulo de elasticidade do aço (kN/cm²);

$\sigma_{máx}$ – Tensão a compressão do aparelho sobre carga máxima (Kn/cm²).

Lembrando que $t_{s,min}$ é fornecido pelo fabricante, de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 2 - Espessura de elastômero de acordo com chapa de aço

<i>Espessura das camadas elastoméricas</i>	<i>Espessura mínima das chapas de aço</i>
5 mm	2 mm
6 a 10 mm	3 mm
11 a 14 mm	4 mm
15 a 20 mm	5 mm

8. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Inicialmente foi realizado o cálculo de deformação do neoprene (equação 3 e 4) para determinar a força horizontal accidental resultante da nova variação de temperatura, em seguida foram estabelecidos as características da estrutura que estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas verticais permanentes e accidentais

<u>Vigas</u>		unid.	<u>Lajes e pré-lajes</u>		unid.
Área de concreto	0,48	m ²	Eixo entre vigas	3,3	m
Vão livre	19,7	m	Vão longitudinal	20	m
Volume	9,46	m ³	Espessura	0,25	m
Peso da viga (P)	23,64	tf	Peso do tabuleiro (P)	41,25	tf
Carga por neoprene (P/4)	5,91	tf	Carga por neoprene (P/4)	10,31	tf
<u>Pavimento</u>		unid.	<u>Multidão</u>		unid.
Eixo entre vigas	3,3	m	Eixo entre vigas	3,3	m
Vão longitudinal	20	m	Vão longitudinal	20	m

Espessura	0,07	m	Carga distribuida	0,5	tf/m ²
Peso do tabuleiro (P)	11,09	tf	Peso do tabuleiro (P)	33	tf
Carga por neoprene (P/4)	2,77	tf	Carga por neoprene (P/4)	8,25	tf
<u>Veículos</u>		unid.			
Carga do veículo	21,6	tf	Carga vertical permanente total por neoprene (Fg) 5,91+10,31+2,77= 18,99 tf		
Número de apoios sob a carga	2	unid.	Carga vertical accidental total por neoprene (Fq) 8,25 + 10,80= 19,05 tf		
Carga por neoprene (P/4)	10,80	tf			

Fonte: DNIT (2012).

Após inserir as equações em planilhas, partindo das dimensões e restrições apresentadas na Tabela 4, foi possível determinar o neoprene que melhor se adequava a situação.

Tabela 4 - Catálogo NEOPREX

	Dimens ões axb ou d (mm)	Altura do aparelho		Espessuras (mm)		Camadas de elastômeros	Camadas de aço	Número de chapas	
		Mín	Máx	Cobrimento Vertical	Horizont al			Mín	Máx
Executado	100x100	14	35	2,5	4	5	2	1	4
	100x150	14	35	2,5	4	5	2	1	4
	100x200	14	35	2,5	4	5	2	1	4
	150x200	21	42	2,5	4	5	2	2	5
	φ200	21	42	2,5	4	5	2	2	5
	150x250	21	42	2,5	4	5	2	2	5
Proposto	150x300	21	42	2,5	4	5	2	2	5
	φ250	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	200x250	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	200x300	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	200x350	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	φ300	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	200x400	30	63	2,5	4	8	3	2	5
	250x300	30	74	2,5	4	8	3	2	6
	φ350	30	74	2,5	4	8	3	2	6

Fonte: Neoprex (2012).

A seguir são apresentados as características do neoprene utilizado no projeto e o neoprene adotado capaz de suportar as verificações.

Tabela 5 - Características do neoprene de projeto e o neoprene adotado.

EXECUTADO		PROPOSTO		unidade
a	15	a	20	cm
a'	14,2	a'	19,2	cm
b	30	b	25	cm
b'	29,2	b'	24,2	cm
Ar	414,64	Ar	464,64	cm ²
T	2,8	T	5,2	cm
h _n	0,5	h _n	0,8	cm
n	3	n	4	
ts	0,2	ts	0,3	cm
t	1,5	t	3,2	cm
Cobri.hori	0,25	Cobri.hori	0,25	cm
Cobri.vert	0,4	Cobri.vert	0,4	cm
α _g	0,0050	α _g	0,0050	rad
k	1,5	k	1,5	
α _q	0,0033	α _q	0,0033	rad
F _{yk}	2100	F _{yk}	2100	kgf/cm ²
G _n	10	G _n	10	kgf/cm ²

Fonte: Do autor (2013), DNIT (2012).

Para o cálculo das duas situações será utilizado como ΔT , um valor superior a máxima variação térmica apresentada pela figura 6, $\Delta T = 40^\circ\text{C}$.

Utilizando a Equação 4 é possível determinar a tensão horizontal causada pela dilatação térmica.

$$\frac{U_g}{2} = \ell \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{Equação 4} \quad \rightarrow \quad = (80 \cdot 10^{-5} \cdot 40)/2 \rightarrow U_g = 1,6 \text{ cm}$$

Outro fator que gera carga horizontal acidental é o efeito de frenagem ou aceleração. De acordo com a NBR 7187/2003:

7.2.1.5 Efeitos da frenação e da aceleração

7.2.1.5.1 O valor característico da força longitudinal provocada pela frenação ou pela aceleração de veículos sobre as pontes deve ser tomado como uma fração das cargas móveis, consideradas sem impacto.

7.2.1.5.2 Nas pontes rodoviárias, a força longitudinal devida à frenação ou à aceleração dos veículos deve ser considerada aplicada na superfície de rolamento e igual ao maior dos seguintes valores: 5% do peso do carregamento do tabuleiro com as cargas móveis distribuídas, excluídos os passeios, ou 30% do peso do veículo tipo. (NBR 7187, 2003, p.2)

Sendo assim temos o seguinte quadro de cargas acidentais horizontais:

Tabela 6 - Cargas horizontais acidentais

Dilatação térmica		unid.	Frenagem e aceleração		unid.
Deformação do neoprene	0,016	m	Largura	11,46	m
Módulo transversal	100	kn/m ²	Vão livre	80	m
Área em planta	0,045	m ²	Carga distribuída	0,5	tf/m ²
Σ das espes. do neoprene	0,04	m	Frenagem e aceleração	22,92	tf
Carga por neoprene (H _g)	1,8	tf	Carga por neoprene	0,36	tf
Carga horizontal total por neoprene (H _q) = 2,16 tf					

Fonte: Do autor (2013).

9. RESULTADOS

As seguintes verificações estão relacionadas ao neoprene proposto, a Tabela 8 apresentará uma comparação dos resultados encontrados para os dois neoprenes.

Tabela 7 - Verificação do aparelho de apoio adotado.

1) Verificação quanto a deslocamento accidental					
Equação:		6.1			
U_q	=	0,58			
2) Limite de compressão sob carga accidental					
Equação:		6.2			
$\sigma_{máx}$	=	92,33	<	< 125 Mpa	
3) Fator de forma					
Equação:		6.3			
F_f	=	6,94			
4) Tensão de cisalhamento devido a rotação					
Equação:		6.4			
E_α	=	0,60			
5) Tensão de cisalhamento devido a compressão					
Equação:		6.5			
E_c	=	2,21			
6) Tensão de cisalhamento devido a deslocamentos					
Equação:		6.6			
E_h	=	0,68			
7) Somatório das tensões de cisalhamento					
Equação:		6.7			
Σc	=	3,49		< 5 – OK!	
8) Limitação de deslocamento horizontal					
Equação:		6.8			
T_{gyg}	=	0,50		$\leq 0,5$ – OK!	
Equação:		6.9			
T_{gyg+q}	=	0,68		$\leq 0,7$ – OK!	
9) Verificação de estabilidade a rotação					
Equação:		6.10			
ΣV	=	0,20	\geq	0,04 – OK!	
Sob cargas permanentes:					
Equação:		6.11			
Σv	=	0,10	>	0,04 – OK!	
10) Verificação flambagem					
Equação:		6.12			
ΣV	=	170,94	>	81,87 – OK!	
11) Dimensionamento das chapas de aço					
Equação:		6.13			
ΣV	=	0,02	<	$t_{smin} = 3 \text{ mm}$	
Adotar chapa de 3 mm					

Fonte: Do autor (2013).

Tabela 8 – Resumo e comparação de resultados.

	EXECUTADO	VERIF.	PROPOSTO	VERIF.
2) Limite de compressão sob carga acidental	105,91	< 100 MPA	92,33	< 125 MPA
7) Somatório das tensões de cisalhamento	4,10	< 5	3,49	< 5
8) Limitação de deslocamento horizontal Tgyg	1,07	$\leq 0,5$	0,50	$\leq 0,5$
8) Limitação de deslocamento horizontal Tgyg+q	1,27	$\leq 0,7$	0,68	$\leq 0,7$
9) Verificação de estabilidade a rotação	0,20	$\geq 0,04$	0,20	$\geq 0,04$
9) V. de estab. a rotação sob cargas permanentes	0,10	> 0,04	0,10	> 0,04
10) Verificação flambagem	430,30	> 91,74	170,94	> 81,87

Fonte: Do autor (2013).

Fica evidente após observar a tabela 8, que o neoprene de projeto não teria como atingir as especificações necessárias, já que não contava com uma tensão extra gerada pela deformação térmica excessiva.

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao final do estudo, é possível observar que projetos com cadeias de grande extensão de concreto, merecem maior estudo da região onde serão executadas, devido a possibilidade de ocorrer significativas dilatações com capacidade de comprometer toda uma estrutura. Fica recomendado que a norma seja verificada quanto a possibilidade de enfatizar a existência de regiões atípicas ou até mesmo recomendar uma variação térmica de cálculo superior a recomendada atualmente, já que como muitas das normas brasileiras estão embasadas nas normas européias, é necessário realizar adequações para aplicação das mesmas no Brasil, principalmente quando se refere ao clima que é consideravelmente diferente do europeu.

Quanto a execução de pontes ou viadutos com rampas longitudinais acentuadas, fica recomendação a utilização de coeficientes de segurança adicionais, com intuito de suportar possíveis excentricidades agravadas pela força gravitacional. Outra observação, referente a execução, é que para este tipo de situação é recomendável utilizar uma camada de 2 a 3 cm de graute ou resina auto-adensável afim de garantir

e facilitar a execução do nivelamento do apoio. Sobre a manutenção, realizar um plano de inspeção para evitar a presença de resíduos sólidos ou químicos que possam influenciar no desempenho e até mesmo para checar os períodos de substituição do aparelho de neoprene fretado.

E por fim, no processo de dimensionamento, ficou claro que a variação térmica foi determinante para gerar uma carga extra, suficiente para ultrapassar a capacidade de deformação do elastômero dimensionado inicialmente, desta forma recomenda-se que, no caso de não serem utilizados outros métodos para suprir a incapacidade do aparelho aplicado, a substituição por um neoprene fretado com as mesmas dimensões do aparelho proposto para os cálculos do presente trabalho.

E por fim, vale salientar que atualmente a empresa responsável resolveu o problema por meio de travamento em determinadas partes, aumento da área dos calços e reposicionamento dos neoprenes deslocados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - **NBR 7187** – Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento, Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Projetos de Obras-de-Arte Especiais**, Rio de Janeiro, 1996.

Carvalho, Roberto Chust; Filho, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Calculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, 3. ed. – São Carlos 2010.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Plano CNT de logística**. Disponível em:<<http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Plano%20CNT%20de%20Log%C3%ADstica/PlanoCNTdeLog2011.pdf>>. Acesso em 02 jun 2013.

El Debs, Mounir Khalil; Takeya, Toshiaki. **Introdução às Pontes de Concreto** – São Carlos 2009.

Elastim Maborin. **Neoprene fretado**. Disponível em:<<http://www.elastim.com.br/site/2010/01/neoprene-fretado/>>. Acesso em: 10 set 2013.

GUERREIRO, L. **A borracha na concepção anti-sísmica**. Portugal, 17 dez. 2003a. 29 f.(Notas de Aula) – Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto. Disponível em:<http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr_Estr/NovosMateriais/apontamentos/teorica/Borracha%20%20A%20Borracha%20na%20Concepcao%20Antisismica.pdf>. Acesso em: 23 set. 2013.

Leonhardt, Fritz. **Construções de Concreto**, Rio de Janeiro: ed. Interciência, vol. 6, 1979.

Marchetti, Osvaldemar. **Pontes de Concreto Armado**, São Paulo: ed. Edgard Blucher, 2007.

NEOPREX. **Manual técnico**. Disponível em:
<<http://www.neoprex.com.br/manualtecnico>>. Acesso em: 17 out 2013.

Pretti, Bruno de Moraes. **Pontes em Pórticos de Pequenos Vãos com Superestrutura Formada de Elementos Pré-moldados: Estudo de Caso**. 1995. p.211, graduação em eng. Civil – USP, São Paulo.

PFEIL, W. **Pontes em concreto armado**. 4. ed. Rio de Janeiro/RJ: Livros Técnicos e Científicos Ltda, 1988. 490p.

RODRIGUES, M.L.G., ARAUJO, C.E.S., MINUZZI, R.B., BORGES, R.C., MONTEIRO, A. N. **Aviso de temperatura extrema em Santa Catarina a partir da comparação de temperatura prevista com a climatologia**. Florianópolis – SC: Epagri, 2009. 9p. (Relatório do Projeto PREVISÃO DE EVENTOS EXTREMOS NO SUL DO BRASIL – FINEP 14). Disponível em<http://ciram.com.br/finep14/Rel_Finep14_Temp.pdf>

Stein, Alberto Scheffer. **Comparação de procedimentos de dimensionamento de aparelhos de apoio elastoméricos**. 2012. p.66, graduação em eng. Civil – FURB, Blumenau.